

فشارهای هیدرودینامیکی نوسانی کف حوضچه‌های آرامش پرش هیدرولیکی مستغرق

سید نصراله موسوی^{۱*}، علی ابراهیم‌زاده^۲، پویا الله‌وردی‌پور^۳ و محمدعلی قربانی^۴

چکیده

تغییرات لحظه‌ای نوسانات فشار هیدرودینامیکی در نقاط مختلف پرش هیدرولیکی متفاوت بوده و بررسی مستقیم این داده‌ها عملاً مقدور نیست؛ از این‌رو، برای توصیف مشخصات نوسانی پرش هیدرولیکی پارامترهای آماری به کار گرفته می‌شوند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای آماری ضریب بی‌بعد شدت نوسانات فشار (C'_p) است. درک بهتر نوسانات فشار پرش هیدرولیکی و توزیع مکانی آن‌ها منجر به طراحی اقتصادی و ایمنی بیشتر حوضچه‌های آرامش می‌شود. در پژوهش حاضر، ضریب C'_p برای آنالیز داده‌های فشار هیدرودینامیکی پرش هیدرولیکی با نسبت‌های مختلف استغراق و برای اعداد فرود اولیه (Fr_1) مختلف نسبتاً بالا در محدوده ۷ تا ۹/۵ بررسی شده است؛ برای این منظور، تعدادی پیژومتر در امتداد خط مرکزی کف حوضچه‌های آرامش پیشنهادی USBR شامل حوضچه تیپ یک با بستر صاف و حوضچه تیپ دو دارای بلوک‌های پای تندآب و آستانه انتهایی دنداندار بر فلوام آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. میزان افزایش ضریب C'_p با کاهش عدد فرود در پرش هیدرولیکی با نسبت‌های مختلف استغراق، برای محدوده بالادست حوضچه‌های تیپ یک و دو، به‌طور متوسط به‌ترتیب برابر با ۷ و ۴/۸ درصد استخراج شد. توزیع کلی داده‌ها در محدوده پایین‌دست حوضچه تیپ دو نشان داد که حداکثر میزان کاهش مقادیر C'_p در پرش مستغرق در مقایسه با پرش آزاد، در حدود ۳۶ درصد بوده که مربوط به عدد فرود ۷/۵۹ و نسبت استغراق (S) ۱/۱ است. همچنین حداقل میزان کاهش مقادیر C'_p در محدوده پایین‌دست حوضچه تیپ دو در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد، در حدود ۹/۲ درصد و مربوط به عدد فرود ۸/۳۴ و نسبت استغراق ۱/۴ است. تغییرات ضریب C'_{pmax} با افزایش پارامتر S برای مقادیر مختلف Fr_1 ، از یک روند معین تبعیت نمی‌کند. برای مقادیر عدد فرود حداقل، با افزایش S مقادیر ضریب C'_{pmax} تقریباً دارای روند کاهشی است و بالعکس.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش USBR، عدد فرود، ضریب C'_p ، فشارهای نوسانی، نسبت استغراق.

ارجاع: موسوی س. ن. ابراهیم‌زاده ع. الله‌وردی‌پور پ. و قربانی م. ۱۴۰۲. فشارهای هیدرودینامیکی نوسانی کف حوضچه‌های آرامش پرش هیدرولیکی مستغرق. مجله پژوهش آب ایران. ۵۰: ۷۵-۹۱. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14312.2510>

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند، مرند، ایران.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.

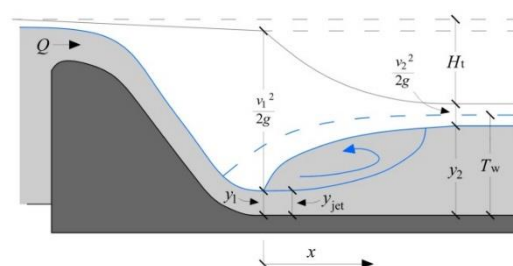
* نویسنده مسئول: s.n.mousavi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶

مقدمه

پرش هیدرولیکی تابعی از خصوصیات جریان متلاطم شامل میدان سرعت و فشار است. توصیف نیروهایی که در نزدیکی کف حوضچه آرامش رخ می‌دهند، اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به‌منظور جلوگیری از خسارات احتمالی ناشی از انرژی زیاد آب در سرعت‌های فوق‌بحرانی و کاهش انرژی جنبشی جریان پایین‌دست سرریزها، انواع مختلف سازه‌های هیدرولیکی مستهلک‌کننده انرژی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. مطابق با شکل ۱، با تشکیل پدیده پرش هیدرولیکی پایدار در داخل حوضچه‌های آرامش، انرژی جریان مستهلک می‌شود (استونیک، ۲۰۲۳).



شکل ۱- پرش هیدرولیکی پایین‌دست سرریز (استونیک، ۲۰۲۳)

با توجه به بار آبی بالادست سرریزها، احتمالاً حوضچه‌های آرامش در معرض فشار زیاد لحظه‌ای قرار گرفته و تنش‌های قابل‌توجهی در چنین سازه‌هایی ایجاد می‌شود. عملکرد جریان ممکن است به گونه‌ای شود که باعث بالآمدن پوشش بتنی کف حوضچه آرامش شده و نیاز به مجهزکردن این سازه‌ها با وزن کافی یا مهاربندی آن‌ها باشد. با تجزیه و تحلیل داده‌ها و با توجه به مقادیر فشار میانگین، شدت نوسانات فشار و نیز فشارهای حدی می‌توان نیروهای مؤثر در پدیده پرش هیدرولیکی را توصیف کرد (آلوز، ۲۰۰۸). استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی ناشی از ایجاد، جابه‌جایی، انتشار و استهلاک گرداب‌های تلاطمی بوده که همواره با نوسانات شدید فشار بر کف حوضچه آرامش وارد می‌شود. از طرفی وجود موانع در بستر حوضچه می‌تواند سبب تغییر رفتار خطوط جریان و تشکیل گردابه‌ها در طول پرش شده و ضروری است تا اثر آن‌ها بر مشخصات هیدرودینامیکی پرش مورد مطالعه قرار گیرد (کریمی و همکاران، ۲۰۱۷). چنانچه

عمق پایاب جریان کمتر از عمق ثانویه پرش در وضعیت جریان زیر بحرانی شود، پرش به صورت آزاد خواهد بود و به بیرون از حوضچه آرامش جاروب می‌شود که منجر به آبشستگی پایین‌دست کانال می‌شود. از طرف دیگر، هنگامی که مقدار دبی جریان بیشتر از دبی طراحی شود، عمق پایاب (T_w) بیشتر از عمق متناظر پرش آزاد (y_2) خواهد بود. تحت چنین شرایطی، پرش مستغرق تشکیل می‌شود (شکل ۱).

خصوصیات جریان پرش مستغرق به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت از پرش آزاد است. مشاهده شده است که با افزایش استغراق در پرش هیدرولیکی، اختلاط جت کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش استهلاک انرژی در مقایسه با پرش‌های آزاد می‌شود (راجاراتنام، ۱۹۶۷). این مسأله به‌عنوان یک ویژگی نامطلوب برای پرش مستغرق محسوب می‌شود. چنانچه پرش مستغرق به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی مورد استفاده قرار گیرد، نیاز به حوضچه آرامش طولانی‌تر است. باین‌حال، پرش مستغرق نسبت به تغییرات عمق پایاب دارای حساسیت کمتری بوده که این یک مزیت نسبت به پرش‌های آزاد است. حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست سازه‌های روگذر با بار آبی کم، اغلب تحت شرایط پرش مستغرق بهره‌برداری می‌شوند؛ بنابراین، پرش هیدرولیکی مستغرق اغلب در حوضچه‌های طراحی‌شده برای پرش‌های آزاد اتفاق می‌افتد (حبیب‌زاده و همکاران، ۲۰۱۱). مطابق با پژوهش عبدالقادر و الانگو (۱۹۷۴)، مقدار ضریب بی‌بعد شدت نوسانات فشارهای C'_p در پرش کلاسیک با افزایش فاصله از پنجه پرش افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، مجدداً سیر نزولی پیدا می‌کند و در انتهای پرش، مقدار آن تثبیت می‌شود. نتایج فیوروتو و رینالدو (۱۹۹۲a) نشان داد که توزیع طولی نوسانات فشار، همگن نبوده و بستگی به موقعیت نقطه مورد نظر دارد. با افزایش عدد فرود، مقادیر حداکثر C'_p در فاصله بیشتری نسبت به ابتدای حوضچه مشاهده می‌شود. در پژوهش فیوروتو و رینالدو (۱۹۹۲b) معیاری برای طراحی دال کف مناسب با تعیین حداکثر فشار بالابر لحظه‌ای وارد بر پوشش ارائه شد. مطابق با نظر مارکز و همکاران (۱۹۹۷)، توزیع فشار در امتداد پرش هیدرولیکی از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند.

هیدرولیکی آزاد در حوضچه‌های آرامش با بستر زبر در پایین‌دست دریچه کشویی انجام شده است. در خصوص اثر توأم بلوک‌های پای تندآب و آستانه انتهایی حوضچه آرامش بر نوسانات فشار کف حوضچه در پایین‌دست سرریز با تغییر عدد فرود اولیه جریان در نسبت‌های مختلف استغراق پرش هیدرولیکی مطالعه کافی صورت نگرفته است. هدف از پژوهش حاضر، شناخت بهتر مکانیسم نوسانات فشار و تعیین مقادیر ضریب شدت نوسانات فشار (C'_p) پرش هیدرولیکی در کف حوضچه‌های آرامش USBR تیپ یک (بستر صاف) و تیپ دو شامل بلوک‌های پای تندآب و آستانه انتهایی دندانه‌دار در پایین‌دست سرریز با تغییر مقادیر عدد فرود جریان ورودی (Fr_1) در نسبت‌های مختلف استغراق جریان در پایین‌دست حوضچه‌های استهلاک انرژی (S) است.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، ضریب شدت نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی بر کف حوضچه‌های آرامش تیپ یک و دو USBR براساس داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی شده است. برای این منظور، آزمایش‌های متعددی در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز انجام شد. فلوم آزمایشگاهی دارای مقطع مستطیلی به طول ۱۰، عرض ۰/۵۱ و ارتفاع دیواره‌های ۰/۵ متر است. با توجه به ارتفاع سرریز اوجی ($H=70$ cm) مورد استفاده برای تأمین بار آبی مورد نیاز، ارتفاع فلوم در طول حدود ۱/۵ متر به ۱۰۰ سانتی‌متر افزایش داده شد. ابعاد سرریز اوجی شکل و حوضچه‌های آرامش براساس معیارهای USBR طراحی شده‌اند (بی‌نام، ۱۹۸۷؛ چانسون و کاروالهو، ۲۰۱۵). طول حوضچه تیپ یک (L_I) و تیپ دو (L_{II}) براساس مقدار دبی جریان عبوری حداکثر، به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۱۲۵ سانتی‌متر محاسبه شده است. نمای پایین‌دست سرریز در حوضچه تیپ دو در شکل ۲ نشان داده شده است. تشکیل پرش هیدرولیکی از زوایای مختلف در شکل ۳ مشاهده می‌شود. مقطع طولی حوضچه تیپ دو در شکل ۴ نشان داده شده است. ابعاد متعلقات حوضچه تیپ دو ($basin_{III}$) شامل بلوک‌های پای تندآب و آستانه انتهایی دندانه‌دار در جدول ۱ ارائه شده است. برای مشاهده سایر جزئیات به موسوی و همکاران (۱۳۹۹) رجوع شود.

تیشیرا و همکاران (۲۰۰۴) روند تغییرات حداکثر نوسانات فشار ($C'_{p\ max}$) و موقعیت نسبی آن را در پرش آزاد بررسی کردند. نتو و مارکز (۲۰۰۸) به این نتیجه رسیدند که استغراق پرش هیدرولیکی باعث افزایش ضریب C'_p در محدوده پایین‌دست حوضچه می‌شود. افزایش عدد فرود منجر به افزایش ضریب C'_p در ناحیه انتهایی می‌شود. در تحقیق آلوز (۲۰۰۸) روش‌هایی برای تخمین مقادیر حدی فشار وارد بر یک پوشش دال حوضچه با ابعاد معین ارائه شد که با استفاده از آن‌ها می‌توان سازه‌های مقاوم به نیروهای فشار بالابر را طراحی کرد. به‌منظور تجزیه و تحلیل نیروهایی که پایداری دال حوضچه آرامش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تعیین دامنه حدی مقادیر فشار، یک امر بدیهی است. مقادیر ضرایب فشار حدی تحت تأثیر پارامتر عدد فرود اولیه جریان و مدت زمان بهره‌برداری است. در تحقیق توسو و باورز (۱۹۸۸)، مقادیر بالا در حدود واحد برای ضرایب فشار حدی در مدت زمان آزمایش طولانی مشاهده شده است.

همپه و همکاران (۲۰۲۰) روش پیشنهادی تیشیرا (۲۰۰۳) را برای تخمین فشارهای حدی در کف حوضچه آرامش صاف واقع در پایین‌دست سرریزهای با بار آبی کم توسعه دادند. نتایج حسنی و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که زبری بستر و انبساط ناگهانی دیواره‌های حوضچه آرامش باعث تولید گردابه‌ها و گرداب‌های جانبی شده که منجر به کاهش ضریب C'_p و افزایش استهلاک انرژی در حوضچه می‌شود. موضوع مشخصات هیدرودینامیکی و نوسانات فشار پرش هیدرولیکی پس از حادثه تخریب‌های ایجادشده در حوضچه آرامش سد کارنافولی در بنگلادش مشهود است (باورز و توسو، ۱۹۸۸). اساس نوسانات فشار در سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی ناشی از ماهیت نوسانی پرش هیدرولیکی بوده که در اثر گرداب‌های شدید و اختلاط آب با هوا ایجاد می‌شود. شناسایی و اندازه‌گیری فشارهای هیدرودینامیکی بستر نقش بسزایی در محاسبه ضخامت دال کف حوضچه‌ها، برآورد پتانسیل کاویتاسیون، آنالیز ارتعاش بلوک‌ها و نیروی وارده بر بلوک‌ها در اختیار طراحان قرار می‌دهد. درک بهتر فشارهای نوسانی و توزیع آن‌ها از لحاظ زمانی و مکانی منجر به طراحی اقتصادی‌تر و ایمنی بیشتر سازه‌های هیدرولیکی مستهلک‌کننده انرژی می‌شود.

اغلب پژوهش‌ها در زمینه فشارهای هیدرودینامیکی پرش

شرایط جریان آزاد با استفاده از معادلات زیر محاسبه شده است (پترکا، ۱۹۸۴؛ چادری، ۲۰۰۸).

با توجه به بروز مشکلات مختلف از جمله وجود حباب هوا در محل عمق اولیه پرش آزاد و حساسیت بالای این مقادیر برای محاسبه اعداد فرود اولیه (Fr_1)، مقادیر Y_1 در

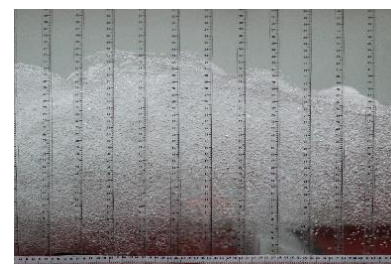
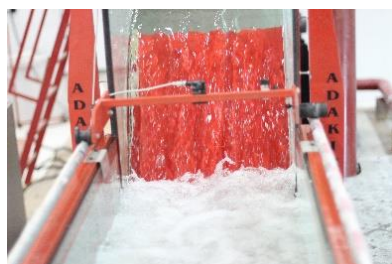


(ب)

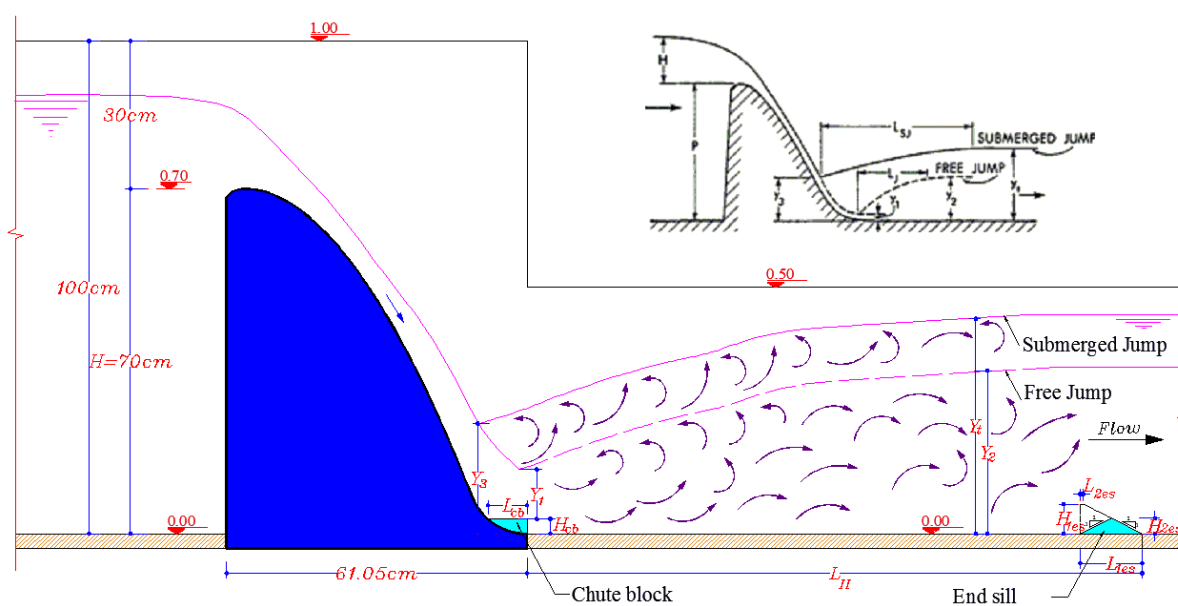


(الف)

شکل ۲- نمای پایین دست سرریز، حوضچه تپ دو (الف) و تشکیل پرش مستغرق (ب)



شکل ۳- تشکیل پرش هیدرولیکی در حوضچه از زوایای مختلف



شکل ۴- مقطع طولی حوضچه تپ دو USBR

جدول ۱- ابعاد متعلقات نصب شده در حوضچه تیپ دو USBR

پارامتر	نماد	مقدار (سانتی متر)
ارتفاع بلوکهای پای تندآب	H_{cb}	۳/۰۰
طول بلوکها	L_{cb}	۷/۹۴
عرض بلوکها	W_{cb}	۳/۲۰
فاصله بین بلوکها	S_{cb}	۳/۲۰
فاصله بین بلوکها و دیوارهای انتهایی حوضچه	S_{cbw}	۱/۵۰
ارتفاع آستانه انتهایی دندانه دار در بالادست	H_{1es}	۶/۰۰
ارتفاع آستانه انتهایی دندانه دار در پایین دست	H_{2es}	۳/۱۵
فاصله بین دندانههای آستانه انتهایی	S_{es}	۴/۶۰
عرض دندانههای آستانه انتهایی	W_{es}	۴/۶۰
طول کف آستانه انتهایی	L_{1es}	۱۲/۶۰
طول لبه بالایی آستانه انتهایی	L_{2es}	۰/۶۰

مقادیر پارامتر Fr_1 برای دبیهای مختلف جریان در محدوده ۷/۱۲ تا ۹/۴۶ محاسبه شده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر، محدوده اعداد فرود اولیه نسبتاً بالا بررسی شده است. عمق جریان در ابتدای پرش مستغرق (Y_3) به عنوان یک اندازه برای تراز استغراق مورد استفاده قرار می گیرد. تشکیل دو نوع پرش آزاد و مستغرق در شرایط آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده و محاسباتی برای هر نقطه فشار در حوضچه های $basin_I$ و $basin_{II}$ به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

$$V_1 = \sqrt{2g \left(Z - \frac{d_0}{2} \right)} \quad (۱)$$

$$Y_1 = \frac{q}{V_1} \quad (۲)$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g Y_1}} \quad (۳)$$

که در آن، d_0 بار آبی بالادست سرریز، Z عمق آب بالادست سرریز ($Z = H + d_0$)، V_1 سرعت اولیه جریان، Y_1 عمق اولیه پرش آزاد، Fr_1 عدد فرود اولیه جریان و g شتاب ثقل زمین هستند. مطابق با جداول ۲ و ۳، آزمایشها در دبیهای مختلف جریان با نسبتهای مختلف استغراق ($S = Y_1/Y_2$) به ترتیب برابر با ۱ (برای پرش آزاد)، ۱/۰۵، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳ و ۱/۴ انجام شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۵- تشکیل پرش هیدرولیکی در فلوم آزمایشگاهی، پرش آزاد (الف) و پرش مستغرق (ب)

جدول ۲- پارامترهای اندازه‌گیری شده و محاسباتی حوضچه آرامش تیپ یک USBR

Q (L/s)						S	پارامتر
۶۰/۴۰	۵۵	۵۲/۷	۴۷/۵	۴۳	۳۳		
۷/۱۲	۷/۴۴	۷/۵۸	۷/۹۶	۸/۳۴	۹/۴۶	۱/۰۰	Fr ₁
۳/۰۴	۲/۷۸	۲/۶۶	۲/۴۱	۲/۱۸	۱/۶۸	۱/۰۰	Y ₁ (cm)
۲۷/۵۵	۲۶/۴۹	۲۶/۰۵	۲۴/۸۷	۲۳/۷۰	۲۰/۶۵	۱/۰۰	Y ₂ (cm)
۱۳/۵۵	۱۳/۷۱	۱۴/۰۰	۱۴/۶۶	۱۳/۰۱	۱۰/۰۱	۱/۰۵	
۱۹/۲۲	۱۸/۸۷	۱۸/۱۴	۱۷/۵۰	۱۶/۶۴	۱۱/۶۰	۱/۱۰	
۲۳/۹۳	۲۳/۵۶	۲۳/۲۵	۲۲/۱۳	۲۰/۷۹	۱۵/۰۴	۱/۲۰	Y ₃ (cm)
۲۸/۹۰	۲۸/۴۳	۲۷/۲۵	۲۵/۶۰	۲۴/۸۱	۲۱/۰۵	۱/۳۰	
۳۲/۳۶	۳۱/۷۲	۳۱/۰۰	۲۹/۸۵	۲۷/۸۵	۲۴/۰۵	۱/۴۰	
۲۸/۹۷	۲۸/۲۱	۲۷/۴۴	۲۶/۲۵	۲۴/۷۸	۲۱/۸۷	۱/۰۵	
۳۰/۳۰	۲۹/۶۳	۲۸/۳۴	۲۷/۴۸	۲۶/۱۸	۲۲/۵۰	۱/۱۰	
۳۳/۱۲	۳۲/۰۴	۳۱/۲۴	۲۹/۸۳	۲۸/۳۰	۲۴/۷۴	۱/۲۰	Y _t (cm)
۳۵/۷۲	۳۴/۸۵	۳۳/۵۷	۳۲/۴۲	۳۰/۷۲	۲۶/۹۷	۱/۳۰	
۳۸/۲۹	۳۷/۳۷	۳۶/۵۸	۳۴/۸۹	۳۲/۹۴	۲۹/۰۳	۱/۴۰	

جدول ۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده و محاسباتی حوضچه آرامش تیپ دو USBR

Q (L/s)						S	پارامتر
۶۰/۴۰	۵۵	۵۲/۷	۴۷/۵	۴۳	۳۳		
۷/۱۲	۷/۴۴	۷/۵۸	۷/۹۶	۸/۳۴	۹/۴۶	۱/۰۰	Fr ₁
۳/۰۴	۲/۷۸	۲/۶۶	۲/۴۱	۲/۱۸	۱/۶۸	۱/۰۰	Y ₁ (cm)
۲۶/۶۰	۲۵/۳۳	۲۴/۷۰	۲۳/۵۷	۲۲/۴۴	۱۹/۶۹	۱/۰۰	Y ₂ (cm)
۱۳/۹۲	۱۲/۸۰	۱۲/۸۶	۱۲/۷۰	۱۳/۱۳	۱۰/۴۹	۱/۰۵	
۱۹/۸۴	۱۶/۶۵	۱۸/۰۷	۱۷/۵۷	۱۶/۰۲	۱۳/۹۴	۱/۱۰	
۲۴/۶۵	۲۳/۱۸	۲۲/۴۹	۲۱/۶۹	۲۰/۰۵	۱۷/۰۰	۱/۲۰	Y ₃ (cm)
۲۸/۵۴	۲۷/۱۳	۲۶/۵۶	۲۵/۳۶	۲۳/۹۲	۲۰/۱۷	۱/۳۰	
۳۲/۴۶	۳۰/۷۷	۳۰/۰۵	۲۸/۶۹	۲۶/۹۸	۲۲/۹۰	۱/۴۰	
۲۷/۸۱	۲۶/۷۰	۲۵/۹۴	۲۴/۸۶	۲۳/۵۵	۲۰/۷۸	۱/۰۵	
۲۹/۳۵	۲۷/۶۹	۲۶/۹۵	۲۶/۰۶	۲۴/۶۲	۲۱/۷۶	۱/۱۰	
۳۲/۱۹	۳۰/۳۷	۲۹/۶۶	۲۸/۴۷	۲۷/۰۴	۲۳/۷۸	۱/۲۰	Y _t (cm)
۳۴/۲۵	۳۲/۸۳	۳۲/۱۵	۳۰/۷۰	۲۹/۱۵	۲۵/۶۸	۱/۳۰	
۳۷/۲۳	۳۵/۵۱	۳۴/۵۴	۳۳/۰۷	۳۱/۳۲	۲۷/۵۰	۱/۴۰	

اندازه‌گیری پارامترهای آزمایشگاهی

خصوصیات جریان

دبی جریان با استفاده از یک دستگاه فلومتر پرتابل اولتراسونیک نوع Trodeks با سنسور TM1 ساخت کشور انگلیس اندازه‌گیری شده است. دقت اندازه‌گیری دبی‌سنج برابر با ۱٪ است. این دستگاه برای سرعت‌های جریان در محدوده ۰/۰۱ تا ۳۰ متر بر ثانیه کاربرد دارد. همچنین

قطر اسمی لوله مکش مورد استفاده برای این نوع دبی‌سنج در محدوده ۱۹ تا ۱۰۰ میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست سرریز (Z)، از سنسور اولتراسونیک Siemens مدل Militronics ساخت کشور کانادا با دقت اسمی سه میلی‌متر استفاده شده است. به‌منظور اندازه‌گیری عمق جریان در پایین‌دست سرریز و در نقاط مختلف داخل حوضچه آرامش شامل

اسمی یک میلی‌متر انجام شد (شکل ۶). فرکانس داده‌برداری سنسورهای سطح‌سنج، ۲۰ هرتز بوده و مدت زمان برداشت داده‌ها، ۳۰۰ ثانیه در هر آزمایش در نظر گرفته شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۶- سنسورهای اندازه‌گیری عمق، جریان، بالادست سرریز (الف) و پایین‌دست سرریز (ب)

است که دارای قابلیت ثبت مقادیر فشار لحظه‌ای در زمان‌های مختلف بوده و سری زمانی فشار را در محل‌های مورد نظر ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری فشارهای لحظه‌ای نقاط واقع در کف حوضچه، با استفاده از شش دستگاه مبدل فشار نوع Atek مدل BCT-110-100 mbar-A مبدل‌های 1/4 G ساخت کشور ترکیه انجام یافته است. مبدل‌های فشار برای محدوده بار فشار ۱۰۰- تا ۱۰۰+ سانتی‌متر واسنجی شده و دقت اسمی اندازه‌گیری آن‌ها $\pm 0.5\%$ درصد است. فرکانس داده‌برداری مبدل‌های فشار، ۲۰ هرتز بوده و مدت زمان برداشت داده‌ها، ۹۰ ثانیه برای هر نقطه فشار در هر آزمایش در نظر گرفته شده است (شکل ۷). مشابه سنسورهای اولتراسونیک سطح‌سنج، مبدل‌های فشار قبل از شروع آزمایش‌ها، با استفاده از تابلوی اندازه‌گیری فشارهای استاتیکی، واسنجی شدند.



(ب)



(الف)

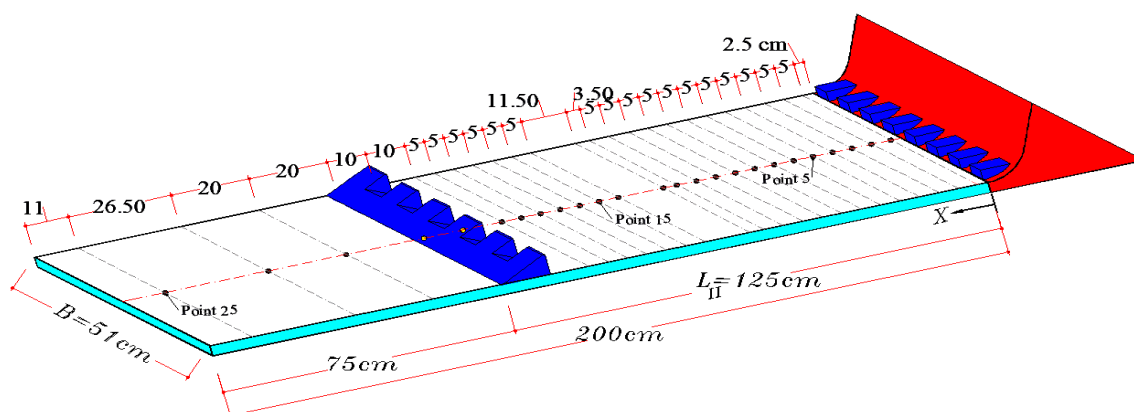
شکل ۷- تجهیزات اندازه‌گیری فشار، مبدل‌های فشار (الف) و سیستم داده‌برداری (ب)

فشارهای نوسانی

اندازه‌گیری نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی تحت تأثیر شرایط آزمایشگاهی شامل عدد رینولدز و عدد فرود جریان در پنجه پرش، توسعه جریان، نوع جریان (آزاد و مستغرق)، فاصله از محل تشکیل پرش، ضمام تعبیه‌شده در کف حوضچه آرامش، نوع دیواره‌های جانبی حوضچه و شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی (پایین‌دست سرریز و دریچه کشویی) است. همچنین، انتخاب نوع دستگاه مبدل فشار، دقت اندازه‌گیری و روش نصب مبدل فشار، طول شیلنگ‌های مورد استفاده، قطر نقطه فشار و مدت زمان داده‌برداری نیز در این زمینه نقش بسزایی دارد. در پرش هیدرولیکی، توزیع فشار به‌صورت غیرهیدرواستاتیک و تابعی از عمق و سرعت آب است. برای اندازه‌گیری فشارهای نوسانی، از دستگاه‌های مبدل فشار استفاده شده

فشار، در حدود ۲۰۰ سانتی‌متر و قطر داخلی شیلنگ‌ها برابر با سه میلی‌متر در نظر گرفته شد. پیزومترهای شماره ۲۳ تا ۲۵ برای اندازه‌گیری فشار کف در خارج از محدوده حوضچه تپ دو پیش‌بینی شده‌اند. موقعیت نقاط اندازه‌گیری فشار کف (X) از ۲/۵ سانتی‌متر (پیزومتر شماره ۱) تا ۱۸۹ سانتی‌متر (پیزومتر شماره ۲۵) است.

مطابق با شکل ۸، تعداد نقاط فشار برابر با ۲۵ نقطه در نظر گرفته شده است. نقاط فشار با استفاده از شیلنگ به سنسورهای فشار متصل می‌شوند. در طول شیلنگ نباید هیچ‌گونه حباب هوایی وجود داشته باشد تا مقدار صحیح فشار به سنسور مربوطه انتقال یابد. در تحقیق حاضر، حداکثر طول شیلنگ‌ها از محل پیزومترها تا سنسور



شکل ۸- آرایش نقاط فشار کف حوضچه تپ دو USBR

آنالیز ابعادی

مقادیر فشارهای نوسانی ناشی از پرش هیدرولیکی بر کف حوضچه آرامش تابعی از متغیرهای مؤثر در جریان با سطح آزاد به شرح زیر هستند.

$$f(\dot{p}, V_1, X, Y_1, Y_2, Y_t, \rho_w, \mu, g) = 0 \quad (5)$$

که در آن، p' جزء نوسانی فشار، V_1 سرعت جریان در مقطع اولیه پرش، X فاصله از پنجه پرش، Y_1 عمق اولیه پرش، Y_2 عمق ثانویه پرش، Y_t عمق پایاب در پرش مستغرق، ρ_w جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی آب و g شتاب ثقل زمین هستند. با استفاده از قضیه π باکینگهام، می‌توان ضریب بی‌بعد شدت نوسانات فشار (C'_p) را در حالت کلی به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعد مؤثر دیگر تعریف کرد.

$$f\left(\frac{\sqrt{(p')^2}}{V_1^2/2g}, \frac{X}{Y_1}, \frac{Y_2}{Y_1}, \frac{Y_t}{Y_1}, \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}, \frac{\rho_w V_1 Y_1}{\mu}\right) = 0 \quad (6)$$

که در آن، $\sqrt{(p')^2}/(V_1^2/2g)$ ضریب بی‌بعد شدت نوسانات فشار (C'_p)، X/Y_1 موقعیت نقاط فشار نسبت به ابتدای حوضچه (Γ_X) و Y_2/Y_1 نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی بوده که تابع عدد فرود است. پارامترهای $\rho_w V_1 Y_1/\mu$ و $V_1/\sqrt{gY_1}$ به ترتیب بیانگر نسبت استغراق (S) در پرش هیدرولیکی، عدد فرود اولیه (Fr_1) و

ضریب شدت نوسانات فشار

ضریب C'_p به صورت تابعی از موقعیت بی‌بعد نقطه مورد نظر در امتداد حوضچه (Γ_X) به صورت زیر تعریف شده است (توسو و باورز، ۱۹۸۸).

$$C'_p = \frac{RMS}{\frac{V_1^2}{2g}} = \frac{\sqrt{(p')^2}}{\frac{V_1^2}{2g}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N [P(X, n\Delta t) - P_X]^2 / N}}{V_1^2 / 2g} \quad (4)$$

$$= f(\Gamma_X) = f\left(\frac{X}{Y_1}\right)$$

که در آن، p' جزء نوسانی فشار و بر حسب متر (سانتی‌متر) ستون آب و RMS انحراف معیار استاندارد نوسانات فشار است. پارامترهای P_X مقدار متوسط زمانی فشار، $P(X, n\Delta t)$ مقدار فشار لحظه‌ای، N تعداد داده‌های برداشت‌شده در سری زمانی و Δt فاصله زمانی بین داده‌ها هستند. در پژوهش حاضر، ضریب بی‌بعد شدت نوسانات فشار (C'_p) برای آنالیز داده‌های فشار هیدرودینامیکی پرش هیدرولیکی بررسی شده است. در تحقیق موسوی و همکاران (۲۰۲۲) خصوصیات جریان و پارامترهای فشار در پرش هیدرولیکی در کف حوضچه آرامش شامل پارامترهای بی‌بعد راندمان استهلاک انرژی (ϵ_t)، ارتفاع نظیر فشار متوسط (Ψ_X^*)، انحراف معیار نوسانات فشار (Φ_X^*)، ضریب حداکثر نوسان فشارهای مثبت (C_p^+)، ضریب حداکثر نوسان فشارهای منفی (C_p^-)، ضریب کل نوسانات فشار (C_p) و ضریب چولگی (A_d) بررسی شدند.

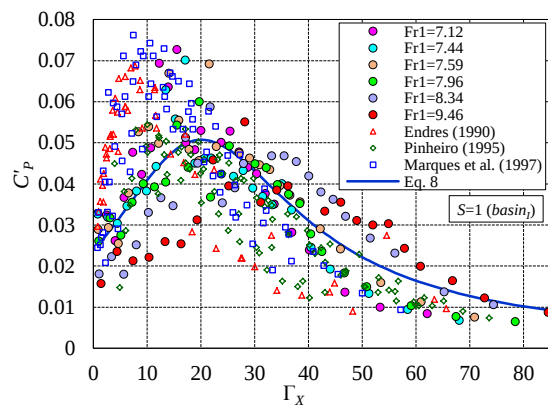
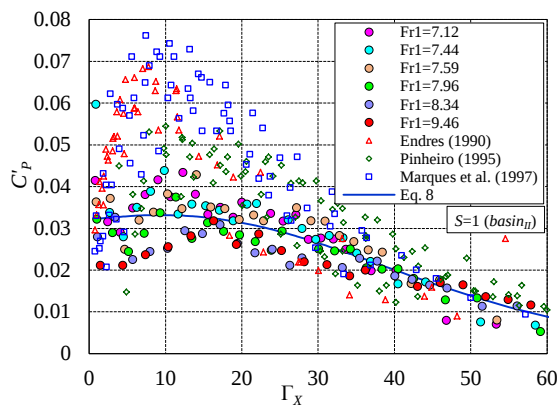
بلوک‌های پای تندآب در داخل حوضچه، برخی از نقاط کف به‌طور مستقیم با جت ناشی از پرش، برخورد نداشته و در نتیجه، مقادیر ضریب C'_p در این نقاط، کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر، بلوک‌های تعبیه‌شده در کف حوضچه تیپ دو، سبب پخشیدگی جت ناشی از پرش هیدرولیکی می‌شوند. مطابق با معادله (۳) برای عدد فرود اولیه جریان، با افزایش دبی جریان عبوری از روی سرریزها، نرخ رشد عمق اولیه پرش هیدرولیکی (Y_1) بیشتر از نرخ رشد سرعت جریان اولیه (V_1) است؛ بنابراین با افزایش دبی جریان، به‌دلیل ناچیز بودن تأثیر تغییرات سرعت جریان در مقایسه با عمق اولیه، عدد فرود اولیه پرش کاهش می‌یابد. در نتیجه، مطابق با معادله (۴) و در پایین‌دست سرریزها، با افزایش عدد فرود در محل عمق اولیه (کاهش دبی جریان ورودی)، نرخ کاهش شدت نوسانات فشار بیشتر از نرخ کاهش انرژی جنبشی است؛ بنابراین با افزایش عدد فرود اولیه، ضریب C'_p کاهش می‌یابد.

عدد رینولدز اولیه (Re_1) هستند. عدد رینولدز بیانگر اثر نیروی لزجت سیال بوده و با توجه به اینکه جریان در پرش هیدرولیکی در محدوده کاملاً متلاطم است، از آن صرف‌نظر می‌شود. عدد فرود در جریان روباز دارای اهمیت فراوانی بوده و در نظر گرفتن آن در پرش هیدرولیکی ضروری است؛ بنابراین معادله (۷) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

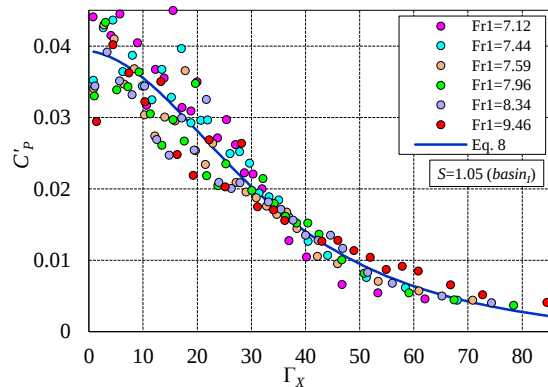
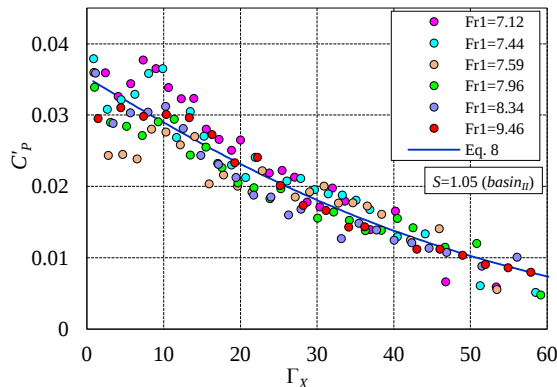
$$C'_p = \frac{\sqrt{(p')^2}}{V_1^2/2g} = f(\Gamma_X, S, Fr_1) \quad (7)$$

نتایج و بحث

نمودارهای تغییرات ضریب C'_p در حوضچه‌های تیپ یک و دو ($basin_I$ و $basin_{II}$) به‌ازای مقادیر مختلف S به‌طور مجزا برای هریک از مقادیر Fr_1 در شکل ۹ ترسیم شده است. محور افقی نمودارها، موقعیت نسبی نقاط فشار از ابتدای حوضچه (Γ_X) را به‌صورت X/Y_1 نشان می‌دهند. با افزایش دبی جریان، انرژی جنبشی و جزء نوسانی فشار افزایش می‌یابد. در حوضچه تیپ دو به‌دلیل وجود

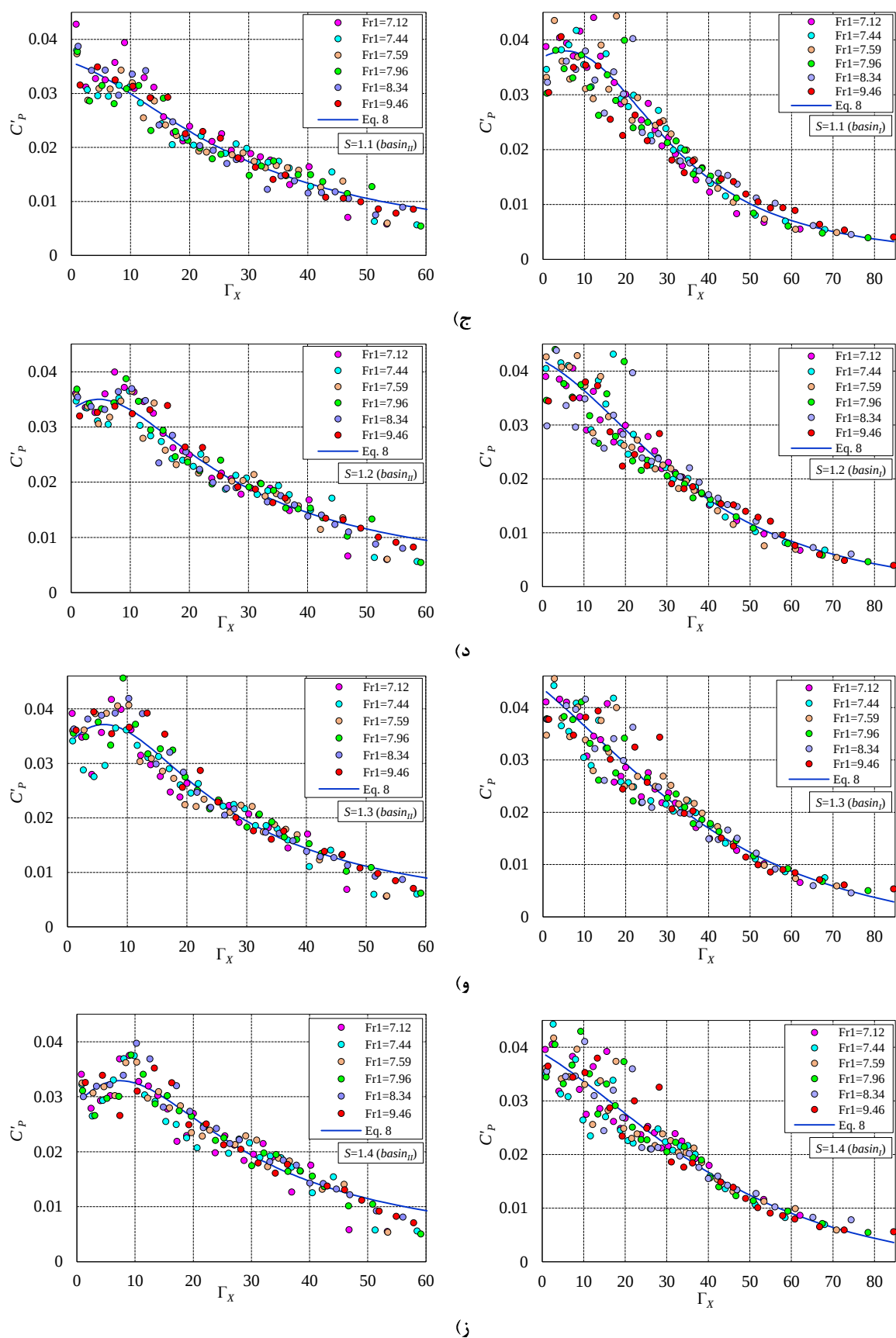


(الف)



(ب)

شکل ۹- تغییرات C'_p با مقادیر مختلف Fr_1 در حوضچه‌های $basin_I$ و $basin_{II}$ (الف) $S=1$ ، (ب) $S=1.05$ ، (ج) $S=1.1$ ، (د) $S=1.2$ ، (و) $S=1.4$ و (ز)



ادامه شکل ۹- تغییرات C_p' با مقادیر مختلف Fr_1 در حوضچه‌های $basin_I$ و $basin_{II}$ ، $S=1$ (الف)، $S=1.05$ (ب)، $S=1.1$ (ج)، $S=1.2$ (د)، $S=1.3$ (و) و $S=1.4$ (ز)

سایر محققان برای پرش‌های تثبیت‌شده مشاهده شده است، مشخص نیست.

مطابق با شکل ۹، تغییرات ضریب C'_p در دو محدوده بالادست و پایین‌دست حوضچه‌ها و در شرایط مختلف پرش آزاد و مستغرق متفاوت است. در جداول ۴ و ۵، به‌ترتیب متوسط درصد تغییرات مقادیر C'_p با کاهش عدد فرود اولیه در حوضچه‌های تیپ یک و دو ارائه شده است. توضیح اینکه علامت مثبت به منزله افزایش مقادیر ضریب C'_p با کاهش پارامتر Fr_1 است و برعکس. روند تغییرات ضریب C'_p در پرش آزاد نشان می‌دهد که در محدوده Γ_X $10 \leq$ حوضچه‌های تیپ یک و دو، مقادیر ضریب C'_p با کاهش پارامتر Fr_1 به‌ترتیب به‌طور متوسط در حدود ۴۹ و ۳۶ درصد افزایش می‌یابند. به‌عبارت‌دیگر، در محدوده بالادست پرش آزاد، میزان افزایش مقادیر ضریب C'_p با کاهش پارامتر Fr_1 در حوضچه تیپ یک بیشتر از تیپ دو است. برای محدوده $\Gamma_X > 10$ ، میزان افزایش مقادیر ضریب C'_p در پرش آزاد با کاهش پارامتر Fr_1 در حوضچه تیپ دو تا حدودی بیشتر از حوضچه تیپ یک است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تغییرات مقدار ضریب C'_p نوسانات فشار در طول پرش دارای بلوک حوضچه تیپ دو بیشتر از پرش در بستر صاف حوضچه تیپ یک است. درواقع وجود بلوک‌ها در ابتدای حوضچه تیپ دو سبب می‌شود تا برخی از نقاط پایین‌دست این نوع حوضچه به‌طور مستقیم با جت ناشی از پرش برخورد نداشته باشند و درنتیجه تغییرات مقدار ضریب C'_p در حوضچه تیپ دو افزایش یابد.

در شرایط پرش مستغرق ($S > 1$)، روند تغییرات ضریب C'_p با کاهش پارامتر Fr_1 به نحوی است که در محدوده $\Gamma_X \leq 10$ از یک روند خاصی تبعیت نمی‌کند. در حالت کلی و در تطابق با نتایج لوپاردو و همکاران (۲۰۰۴)، در محدوده بالادست حوضچه ($\Gamma_X \leq 10$) با کاهش پارامتر Fr_1 ، ضریب C'_p افزایش می‌یابد. اگرچه این رفتار برای همه نسبت‌های استغراق مورد تأیید نیست. در پرش هیدرولیکی با نسبت‌های مختلف استغراق، میزان افزایش ضریب C'_p با کاهش پارامتر Fr_1 برای محدوده بالادست حوضچه‌های تیپ یک و دو، به‌طور متوسط به‌ترتیب برابر با ۷ و ۴/۸ درصد محاسبه شده است. برای حوضچه تیپ دو در محدوده $\Gamma_X > 10$ ، بسته به میزان استغراق پرش، متوسط تغییرات ضریب C'_p با کاهش پارامتر Fr_1 از ۶۲

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب C'_p در ابتدا دارای روند افزایشی هستند. پس از رسیدن به مقدار حداکثر، ضریب C'_p سیر نزولی داشته و با افزایش فاصله از پنجه پرش در پایین‌دست پرش، به مقدار تقریباً ثابت می‌رسد. در طول پرش هیدرولیکی، ضریب C'_p دارای تغییرات نوسانی است. مقادیر حداکثر ضریب C'_p در محدوده ابتدایی حوضچه‌های آرامش رخ می‌دهند. تغییرات نوسانی ضریب C'_p در کف حوضچه تابع عوامل متعددی از قبیل میزان تلاطم جریان، تشکیل گردابه‌ها و حرکت آن‌ها در طول پرش و... است. به نحوی که در برخی از نقاط، برخورد مستقیم گردابه‌ها با کف حوضچه، افزایش فشار وارده بر کف و درنتیجه، افزایش ضریب C'_p را به‌دنبال دارد. با برخورد مستقیم جت آب ورودی از طریق تندآب سرریز به قسمت ابتدایی کف حوضچه، نوسانات فشار کف در محدوده $\Gamma_X \leq 20$ افزایش می‌یابد.

مطابق با تحقیق توسو و باورز (۱۹۸۸)، مقدار پیک ضریب C'_p تقریباً در فاصله ده برابر عمق اولیه پرش آزاد رخ می‌دهد. مارکز و همکاران (۱۹۹۷) موقعیت نوسان فشار حداکثر حوضچه آرامش پایین‌دست سرریز معمولی را در حدود $X/(Y_2 - Y_1) \approx 1.75$ ارائه کردند. در تحقیق نواکوسکی و همکاران (۲۰۱۷) بیشترین نوسان فشار اندازه‌گیری‌شده در حوضچه آرامش پایین‌دست سرریز پله‌ای در موقعیت تقریباً $X/(Y_2 - Y_1) \approx 4$ گزارش شد. مطابق با تحقیق کریمی و همکاران (۲۰۱۷) روی حوضچه با بازشدگی ناگهانی، محل اوج C'_p نسبت به عدد فرود ورودی در تمام موارد، در محدوده $10 < \Gamma_X = X/Y_1 < 30$ رخ می‌دهد. حسن‌پور و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که ضریب C'_p در حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی در موقعیت $X/(Y_2 - Y_1) \approx 2$ به حداکثر مقدار می‌رسد. درحالی‌که به نظر می‌رسد محدوده مجانبی در حدود $X/(Y_2 - Y_1) \approx 8$ به‌دست می‌آید که در آن، تأثیر پرش هیدرولیکی دیگر قابل‌مشاهده نیست. استینک جونپور و همکاران (۲۰۲۱) میزان شباهت بین رفتار پرش‌های هیدرولیکی با عدد فرود پایین و مقادیر فشار برداشت‌شده از پرش‌های هیدرولیکی تثبیت‌شده را در حوضچه پایین‌دست یک سرریز بررسی کردند. براین‌اساس، روند صعودی مقادیر پارامتر بدون بُعد انحراف استاندارد در بازه فاصله بدون بُعد $3 < X/(Y_2 - Y_1) < 1$ و سپس کاهش مقادیر آن اتفاق می‌افتد، اگرچه به اندازه آنچه در نتایج

تغییرات مقادیر ضریب C'_p در دو محدوده بالادست و پایین‌دست حوضچه‌های تیپ یک و دو در شرایط مختلف پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد ارائه شده است. توضیح اینکه علامت منفی به منزله کاهش مقادیر ضریب C'_p در پرش مستغرق در مقایسه با پرش آزاد است و برعکس.

تا ۷۷ درصد متغیر است. میزان تغییرات ضریب C'_p در محدوده پایین‌دست حوضچه تیپ یک تا حدودی مشابه تیپ دو است. به نظر می‌رسد در محدوده پایین‌دست حوضچه‌های تیپ یک و دو، میزان افزایش مقادیر ضریب C'_p با کاهش پارامتر Fr_1 در نسبت‌های استغراق بزرگ‌تر، افزایش می‌یابد. در جداول ۶ و ۷، به ترتیب متوسط درصد

جدول ۴- درصد تغییرات ضریب C'_p نسبت به Fr_1 در حوضچه آرامش تیپ یک

Γ_x	S	Fr_1				
		۷/۱۲	۷/۴۴	۷/۵۹	۷/۹۶	۸/۳۴
$\Gamma_x \leq 10$	۱/۰۰	+۶۳/۲۳	+۵۶/۸۶	+۶۹/۲۰	+۴۹/۱۳	+۶/۹۰
	۱/۰۵	+۴۰/۰۲	+۱۸/۰۵	+۱۱/۸۱	+۴/۷۵	+۲/۵۲
	۱/۱۰	+۲۸/۹۵	+۱۸/۰۱	+۶/۴۵	-۱/۶۶	+۵/۵۶
	۱/۲۰	+۱۱/۴۸	+۱۶/۶۹	+۱۵/۸۸	-۱/۷۶	-۱۱/۲۵
	۱/۳۰	+۱۴/۸۶	-۲/۲۱	-۱/۳۵	+۱/۳۹	+۵/۰۴
	۱/۴۰	+۱/۹۳	-۶/۹۸	+۰/۴۰	-۱/۵۵	+۰/۰۳
$\Gamma_x > 10$	۱/۰۰	+۵۰/۳۱	+۳۴/۲۷	+۴۸/۵۹	+۱۸/۹۷	+۳۴/۷۵
	۱/۰۵	+۹۶/۳۷	+۸۲/۲۴	+۵۸/۹۷	+۴۳/۳۹	+۲۷/۷۵
	۱/۱۰	+۹۵/۱۱	+۸۴/۹۷	+۷۲/۶۹	+۴۷/۳۵	+۴۳/۱۷
	۱/۲۰	+۱۰۳/۰۱	+۸۱/۳۰	+۶۷/۱۸	+۴۹/۸۷	+۴۵/۲۸
	۱/۳۰	+۹۷/۷۱	+۷۹/۷۵	+۷۸/۴۴	+۵۲/۱۷	+۳۳/۴۹
	۱/۴۰	+۱۰۳/۴۴	+۷۳/۵۵	+۷۳/۰۸	+۵۳/۱۱	+۳۹/۴۲

جدول ۵- درصد تغییرات ضریب C'_p نسبت به Fr_1 در حوضچه آرامش تیپ دو

Γ_x	S	Fr_1				
		۷/۱۲	۷/۴۴	۷/۵۹	۷/۹۶	۸/۳۴
$\Gamma_x \leq 10$	۱/۰۰	+۴۴/۹۰	+۶۲/۲۱	+۳۶/۳۹	+۲۴/۸۸	+۱۳/۳۱
	۱/۰۵	+۲۸/۵۸	+۱۶/۶۵	-۷/۰۹	-۱/۶۳	+۴/۴۸
	۱/۱۰	+۱۷/۶۷	+۱/۲۹	+۳/۴۶	-۱/۲۷	+۷/۲۵
	۱/۲۰	+۱۳/۰۱	+۱/۷۷	+۲/۶۴	+۸/۲۹	+۷/۲۲
	۱/۳۰	+۴/۹۷	-۱۳/۱۳	+۴/۲۵	+۰/۰۳	+۴/۱۲
	۱/۴۰	+۶/۵۸	+۲/۳۰	+۳/۵۹	-۲/۱۷	+۵/۸۷
$\Gamma_x > 10$	۱/۰۰	+۱۰۰/۴۱	+۸۲/۲۵	+۸۷/۳۶	+۴۴/۰۳	+۲۳/۹۲
	۱/۰۵	+۱۰۳/۵۶	+۸۲/۴۷	+۷۱/۱۲	+۴۸/۲۴	+۲۳/۴۵
	۱/۱۰	+۹۴/۲۹	+۷۶/۶۰	+۶۷/۰۷	+۵۰/۶۵	+۲۴/۴۵
	۱/۲۰	+۹۱/۶۱	+۷۸/۲۵	+۶۵/۲۳	+۴۹/۶۸	+۲۶/۲۴
	۱/۳۰	+۱۰۶/۷۶	+۸۲/۸۵	+۷۷/۶۵	+۵۹/۳۸	+۳۶/۸۸
	۱/۴۰	+۱۰۳/۴۳	+۸۶/۶۷	+۸۷/۰۵	+۶۰/۵۴	+۴۶/۳۰

جدول ۶- درصد تغییرات ضریب C'_p در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد حوضچه تیپ یک

S					Fr ₁	Γ_x
۱/۴۰	۱/۳۰	۱/۲۰	۱/۱۰	۱/۰۵		
-۳/۵۹	+۱۵/۳۶	+۶/۳۷	+۱۲/۱۵	+۱۹/۸۹	۷/۱۲	$\Gamma_x \leq 10$
+۱/۱۵	+۱۰/۷۱	+۲۶/۲۸	+۱۶/۰۳	+۱۳/۶۳	۷/۴۴	
+۴/۹۴	+۹/۱۶	+۲۳/۰۵	+۳/۲۸	+۷/۲۲	۷/۵۹	
+۱۸/۳۰	+۲۹/۸۳	+۲۰/۳۷	+۹/۷۸	+۱۴/۷۷	۷/۹۶	
+۷۱/۹۹	+۹۱/۰۳	+۵۴/۸۷	+۶۷/۹۲	+۵۹/۸۴	۸/۳۴	
+۸۹/۸۴	+۱۰۰/۶۱	+۹۱/۳۴	+۷۲/۹۵	+۶۸/۷۶	۹/۴۶	
-۳۶/۷۰	-۳۹/۵۷	-۳۸/۶۵	-۴۳/۲۱	-۴۵/۵۸	۷/۱۲	$\Gamma_x > 10$
-۳۹/۰۵	-۳۵/۰۲	-۳۶/۷۹	-۳۷/۸۵	-۴۱/۴۷	۷/۴۴	
-۴۳/۹۳	-۴۱/۷۶	-۴۶/۰۵	-۴۶/۵۹	-۵۲/۹۵	۷/۵۹	
-۳۵/۰۴	-۳۵/۱۷	-۳۸/۱۵	-۴۱/۹۶	-۴۵/۸۶	۷/۹۶	
-۴۶/۸۱	-۴۷/۸۶	-۴۶/۱۵	-۴۸/۱۸	-۵۵/۰۴	۸/۳۴	
-۴۳/۱۶	-۴۰/۸۹	-۴۴/۴۵	-۴۷/۱۴	-۴۸/۶۹	۹/۴۶	

جدول ۷- درصد تغییرات ضریب C'_p در پرش مستغرق نسبت به پرش آزاد حوضچه تیپ دو

S					Fr ₁	Γ_x
۱/۴۰	۱/۳۰	۱/۲۰	۱/۱۰	۱/۰۵		
-۹/۶۲	+۰/۸۳	+۰/۱۱	-۲/۹۶	+۱/۷۵	۷/۱۲	$\Gamma_x \leq 10$
-۱۴/۶۰	-۱۶/۳۲	-۱۱/۷۲	-۱۷/۱۹	-۱۰/۰۲	۷/۴۴	
-۰/۶۲	+۱۷/۱۰	+۱/۶۳	-۲/۳۸	-۱۷/۸۶	۷/۵۹	
+۵/۲۶	+۲۷/۳۰	+۲۰/۸۳	+۶/۸۸	+۰/۶۱	۷/۹۶	
+۲۹/۰۳	+۴۹/۳۸	+۳۴/۸۶	+۳۰/۲۷	+۲۰/۱۰	۸/۳۴	
+۳۷/۱۵	+۶۲/۷۶	+۴۴/۰۲	+۴۳/۶۵	+۳۲/۷۱	۹/۴۶	
-۲۷/۷۸	-۲۶/۲۷	-۲۶/۰۹	-۳۰/۵۴	-۲۷/۱۰	۷/۱۲	$\Gamma_x > 10$
-۲۵/۷۵	-۲۷/۷۸	-۲۴/۰۹	-۳۰/۱۲	-۲۷/۶۶	۷/۴۴	
-۲۶/۸۴	-۲۸/۰۴	-۳۰/۴۱	-۳۵/۶۹	-۳۴/۷۸	۷/۵۹	
-۱۵/۵۰	-۱۲/۱۸	-۱۶/۶۰	-۲۳/۴۴	-۲۵/۰۶	۷/۹۶	
-۹/۱۸	-۱۰/۷۳	-۱۶/۹۲	-۲۴/۵۷	-۲۵/۴۹	۸/۳۴	
-۱۶/۸۲	-۱۳/۵۳	-۱۴/۲۹	-۲۳/۶۷	-۲۳/۵۳	۹/۴۶	

افزایش شدت تلاطم بزرگ مقیاس تأثیر دارد. دی و سرکار (۲۰۰۸) میدان جریان در پرش‌های مستغرق روی بسترهای زبر افقی را بررسی و مشاهده کردند که در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته، نرخ کاهش حداکثر سرعت افقی محلی به دلیل زبری بستر افزایش می‌یابد. همچنین نرخ کاهش حداکثر تنش رینولدز محلی و شدت تلاطم افقی و عمودی در بسترهای زبر کندتر از بسترهای صاف است. در تحقیق حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) مشخص شد که رژیم جت سطحی منحرف شده که در پرش‌های مستغرق

روند تغییرات ضریب C'_p در پرش مستغرق نسبت به آزاد در محدوده $\Gamma_x \leq 10$ ، رفتار مشخصی را نشان نمی‌دهد. در این ناحیه، مقادیر ضریب C'_p مربوط به مقادیر دبی جریان کمتر (اعداد فرود بیشتر)، در پرش مستغرق بیشتر از پرش آزاد است. به نظر می‌رسد در این ناحیه، شدت تلاطم پرش مستغرق، بیشتر از پرش آزاد است. نتایج لانگ و همکاران (۱۹۹۰) نشان می‌دهد که پرش مستغرق دارای میدان سرعت سه‌بعدی با گردابه‌های قائم در پایین‌دست دریچه کشویی است. این موضوع احتمالاً در

با بلوک‌ها رخ می‌دهد، ویژگی‌های جریان مشابه پرش‌های آزاد با بلوک دارد. نتایج نشان داد که این رژیم جریان در پرش‌های مستغرق می‌تواند به‌طور مؤثر به‌عنوان یک استهلاك انرژی در یک حوضچه آرامش با طول تقریباً برابر با طول مورد نیاز برای پرش‌های آزاد استفاده شود. قادری و همکاران (۲۰۲۱) به این نتیجه رسیدند که ضریب تنش برشی بستر و استهلاك انرژی جریان در پرش مستغرق بر زبری‌های مثلی بیشتر از بستر صاف بوده که با افزایش عدد فرود و رودی افزایش می‌یابد.

برای یک عدد فرود معین، متوسط درصد تغییرات مقادیر ضریب C'_p برای نسبت‌های مختلف استغراق پرش هیدرولیکی نسبت به پرش آزاد در حوضچه تپ دو در مقایسه با تپ یک، در هر دو محدوده بالادست و پایین‌دست حوضچه‌های آرامش کاهش یافته است. میزان این تغییرات در ناحیه بالادست حوضچه‌های آرامش برای اعداد فرود پایین، کمتر از اعداد فرود بالا است. توزیع کلی داده‌ها نشان می‌دهد که در محدوده $\Gamma_X > 10$ پرش مستغرق، مقادیر ضریب C'_p با افزایش نسبت استغراق، به‌صورت جزئی دارای روند افزایشی است. به بیان دیگر، درصد کاهش مقادیر جدول ۷ برای استغراق‌های بالاتر، کمتر از استغراق‌های پایین‌تر است. در پرش مستغرق، حداکثر میزان کاهش مقادیر C'_p در محدوده $\Gamma_X > 10$ در مقایسه با پرش آزاد، در حدود ۳۶ درصد بوده که مربوط به عدد فرود ۷/۵۹ و نسبت استغراق ۱/۱ است. حداقل میزان کاهش مقادیر C'_p در محدوده $\Gamma_X > 10$ در پرش مستغرق نسبت به آزاد، در حدود ۹/۲ درصد بوده که مربوط به عدد فرود ۸/۳۴ و نسبت استغراق ۱/۴ است.

مطابق با نتایج لوپاردو و همکاران (۲۰۰۴)، افزایش استغراق پرش هیدرولیکی در پایین‌دست دریچه باعث افزایش ضریب C'_p در محدوده $\Gamma_X > 12$ می‌شود. به نحوی که مقدار C'_p در پرش آزاد به اندازه نصف یا کمتر از آن در استغراق حداکثر می‌شود. با افزایش عدد فرود، اختلاف مقادیر C'_p در شرایط مستغرق و آزاد نسبت به هم، تا حدودی کاهش می‌یابد. برای اعداد فرود حداقل، اختلاف مقادیر C'_p در دو حالت پرش آزاد و مستغرق، قابل‌توجه است. با کاهش شدت نوسانات فشار در پرش مستغرق نسبت به آزاد (برای یک دبی معین)، انرژی جریان در داخل حوضچه به‌طور کامل مستهلک نشده و به پایین‌دست منتقل می‌شود؛ البته تلاش برای کاهش

ضریب C'_p ، در شرایط جریان آزاد (استفاده از موانع) به‌منظور استهلاك بیشتر انرژی است. با استغراق جریان، جلوی استهلاك بیشتر انرژی گرفته می‌شود؛ بنابراین نوسانات فشار باقیمانده در بیرون از حوضچه، خودش را نشان می‌دهد. وجود موانع باعث کاهش مقادیر ضریب C'_p در پرش هیدرولیکی می‌شود. مقادیر C'_{pmax} در شرایط مختلف جریان در داخل حوضچه‌ها در جدول ۸ ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که موقعیت مقادیر C'_{pmax} در پرش آزاد برای حوضچه‌های یک و دو به‌ترتیب در محدوده $\Gamma_{Xmax} < 22$ و $\Gamma_{Xmax} < 16$ است. مقادیر متوسط C'_{pmax} در پرش آزاد برای حوضچه‌های یک و دو به‌ترتیب در حدود ۰/۰۳۹ و ۰/۰۶۲ اندازه‌گیری شده است. میزان کاهش C'_{pmax} در حوضچه دو نسبت به حوضچه یک در پرش آزاد به‌طور متوسط ۳۸ درصد است. مقادیر ضریب C'_{pmax} داده‌های اندرس (۱۹۹۰)، پین‌هیرو (۱۹۹۵) و مارکز و همکاران (۱۹۹۷) در حوضچه‌های صاف، به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶۹، ۰/۰۵۴ و ۰/۰۷۶ هستند. مطابق با جدول ۸، مقادیر C'_{pmax} با افزایش Fr_1 در پرش آزاد و مستغرق دارای روند کاهشی هستند. نرخ کاهش این مقادیر در پرش آزاد، بیشتر از پرش با حداکثر استغراق است. با افزایش نسبت استغراق، مقادیر C'_{pmax} در اعداد فرود مختلف کاهش می‌یابد.

برای اعداد فرود حداقل، C'_{pmax} در پرش آزاد در مقایسه با پرش مستغرق، دارای مقادیر بیشتری است. با کاهش شدت نوسانات فشار در دبی جریان‌های کم، اختلاف مقادیر C'_{pmax} در هر دو پرش آزاد و مستغرق به حداقل می‌رسد. تغییرات C'_{pmax} با افزایش پارامتر S برای مقادیر مختلف Fr_1 ، از یک روند معینی تبعیت نمی‌کند. برای مقادیر عدد فرود حداقل، با افزایش S ، مقادیر C'_{pmax} تقریباً دارای روند کاهشی است و برعکس. نتایج یان و همکاران (۲۰۰۶) نشان می‌دهد که در پرش هیدرولیکی داخل حوضچه با بازشدگی ناگهانی دیواره‌های جانبی پایین‌دست دریچه، برای اعداد فرود اولیه بین ۳/۵۲ تا ۶/۸۶ (دبی جریان ۲۳ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه)، مقادیر C'_{pmax} در محدوده ۰/۰۶ تا ۰/۰۹۵ تغییر می‌کند؛ بنابراین، مقادیر C'_{pmax} برای پرش هیدرولیکی کلاسیک داخل حوضچه یک پژوهش حاضر کمتر از پرش هیدرولیکی مکانی هستند.

جدول ۸- مقادیر اندازه‌گیری شده C'_{Pmax} در شرایط مختلف جریان

نوع حوضچه	S	Fr _I					
		۷/۱۲	۷/۴۴	۷/۵۹	۷/۹۶	۸/۳۴	۹/۴۶
basin _I	۱/۰۰	۰/۰۷۳	۰/۰۷۰	۰/۰۶۷	۰/۰۶۰	۰/۰۵۹	۰/۰۴۶
	۱/۰۵	۰/۰۵۲	۰/۰۴۴	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۳۹	۰/۰۴۰
	۱/۱۰	۰/۰۵۱	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳	۰/۰۳۸	۰/۰۴۶	۰/۰۴۱
	۱/۲۰	۰/۰۴۸	۰/۰۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۹
	۱/۳۰	۰/۰۵۱	۰/۰۴۴	۰/۰۴۶	۰/۰۴۹	۰/۰۵۲	۰/۰۵۳
	۱/۴۰	۰/۰۴۱	۰/۰۴۴	۰/۰۴۲	۰/۰۴۰	۰/۰۴۶	۰/۰۴۸
basin _{II}	۱/۰۰	۰/۰۴۳	۰/۰۴۴	۰/۰۴۳	۰/۰۳۷	۰/۰۳۳	۰/۰۳۲
	۱/۰۵	۰/۰۴۵	۰/۰۳۸	۰/۰۳۶	۰/۰۳۴	۰/۰۳۶	۰/۰۳۰
	۱/۱۰	۰/۰۴۳	۰/۰۳۸	۰/۰۳۷	۰/۰۳۸	۰/۰۳۹	۰/۰۳۵
	۱/۲۰	۰/۰۴۰	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	۰/۰۳۹	۰/۰۳۷	۰/۰۳۴
	۱/۳۰	۰/۰۴۲	۰/۰۳۶	۰/۰۴۱	۰/۰۴۶	۰/۰۴۲	۰/۰۳۹
	۱/۴۰	۰/۰۳۷	۰/۰۳۸	۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	۰/۰۴۰	۰/۰۳۵

رابطه پیشنهادی تخمین ضریب C'_P

در تحقیق حاضر، تابع کسری چندجمله‌ای گویا از مرتبه دو برای تخمین ضریب C'_P به عنوان تابعی از Γ_X ارائه شده است. معادله (۸) در شرایط مختلف جریان ($1 \leq S \leq 1.4$) برای حوضچه یک در محدوده $0 \leq \Gamma_X \leq 85$ و حوضچه دو در محدوده $0 \leq \Gamma_X \leq 60$ پیشنهاد می‌شود. مقادیر ضرایب a ، b ، c و d به ازای مقادیر مختلف S در جدول ۹ ارائه شده است.

برای ارزیابی عملکرد مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری

شده ضریب C'_P در تحقیق حاضر، معیارهای عملکرد آماری ضریب تبیین R^2 ، خطای جذر میانگین مربعات RMSE و خطای میانگین مطلق MAE استفاده شده است. منحنی تغییرات ضریب C'_P پیش‌بینی شده با استفاده از معادله (۸) در شکل ۹ ترسیم شده است.

$$C'_P = \frac{a + b\Gamma_X}{1 + c\Gamma_X + d\Gamma_X^2} \quad (۸)$$

جدول ۹- ضرایب معادله (۸) و معیارهای آماری تخمین ضریب فشار C'_P

نوع حوضچه	S	a	b	c	d	R ²	RMSE	MAE
basin _I	۱/۰۰	۰/۰۲۳۷	۰/۰۰۰۵	-۰/۰۴۴۰	۰/۰۰۱۳	۰/۶۷۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶
	۱/۰۵	۰/۰۳۹۳	-۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۰۷	۰/۹۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
	۱/۱۰	۰/۰۳۶۸	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۱۰	۰/۸۸۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
	۱/۲۰	۰/۰۴۱۹	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۵	۰/۸۸۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
	۱/۳۰	۰/۰۴۳۶	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۰۲	۰/۸۹۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
	۱/۴۰	۰/۰۳۸۹	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۰۳	۰/۸۸۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
basin _{II}	۱/۰۰	۰/۰۳۲۰	-۰/۰۰۰۳	-۰/۰۱۷۳	۰/۰۰۰۴	۰/۶۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴
	۱/۰۵	۰/۰۳۵۳	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۰۲	۰/۸۶۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
	۱/۱۰	۰/۰۳۵۷	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۷۰	۰/۰۰۱۱	۰/۹۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	۱/۲۰	۰/۰۳۳۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۲۶	۰/۹۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	۱/۳۰	۰/۰۳۳۳	۰/۰۰۱۰	-۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۲۸	۰/۹۱۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
	۱/۴۰	۰/۰۲۸۷	۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۲۳	۰/۸۹۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲

نتیجه‌گیری

حدی می‌توان نیروهای مؤثر در پرش هیدرولیکی را توصیف کرد.

منابع

۱. موسوی س.ن. فرسادی‌زاده د. سلماسی ف. و حسین‌زاده دلیر ع. ۱۳۹۹. تأثیر استغراق پرش هیدرولیکی بر نوسانات فشار کف حوضچه آرامش تیپ دو USBR. دانش آب و خاک. ۳۰(۲): ۱۵-۲۲.
2. Abdul Khader M. H. and Elango K. 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*. 12(4): 469-489.
3. Alves A. A. M. 2008. Characteristics of hydrodynamic forces in dissipation basins under hydraulic jumps with low Froude number. Master Thesis, Institute for Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre (in Portuguese).
4. Anonymous. 1987. Spillway. In United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, USBR, Design of small dams. A Water Resources Technical Publication, 3rd ed., Washington: US Government Printing Office. pp. 339-434.
5. Bowers C.E. and Toso J.W. 1988. Karnafuli project, model studies of spillway damage. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(5): 469-483.
6. Chanson H. and Carvalho R. 2015. Hydraulic jumps and stilling basins. In Chanson H, (ed.), *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*; CRC Press: Leiden, Netherlands, pp. 65-104.
7. Chaudhry H. 2008. Basic concepts. In: *Open-channel flow*. Second Edition. Springer-Verlag US. Pp.1-24.
8. Dey S. and Sarkar A. 2008. Characteristics of turbulent flow in submerged jumps on rough beds. *Journal of engineering mechanics*. 134(1): 49-59.
9. Endres L.A.M. 1990. Contribution to development a system for acquisition and processing of instantaneous pressure data in laboratory. Master Thesis, Institute for Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre (in Portuguese).
10. Fiorotto V. and Rinaldo A. 1992a. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*. 30(4): 499-520.
11. Fiorotto V. and Rinaldo A. 1992b. Fluctuation uplift and lining design in

تحقیق حاضر به‌منظور بررسی آزمایشگاهی مقادیر ضریب شدت نوسانات فشار (C'_p) پرش هیدرولیکی در کف حوضچه‌های آرامش USBR تیپ یک و دو در پایین‌دست سرریز با تغییر مقادیر عدد فرود اولیه (Fr_1) در نسبت‌های مختلف استغراق جریان (S) انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از ابتدای حوضچه‌های آرامش، نوسانات فشار لحظه‌ای و در نتیجه، تلاطم جریان در محدوده یک‌سوم ابتدای حوضچه‌ها افزایش یافته و به مقدار حداکثر می‌رسد. همچنین، نقاط واقع در بالادست پرش مستغرق نسبت به آزاد، دارای نوسانات فشار بیشتر و نقاط انتهایی پرش مستغرق نسبت به آزاد، دارای نوسانات فشار کمتری هستند. با افزایش استغراق، موقعیت نقطه حداکثر نوسانات فشار، به سمت ابتدای حوضچه‌ها جابه‌جا می‌شود. در محدوده بالادست پرش آزاد، میزان افزایش مقادیر C'_p با کاهش Fr_1 در حوضچه تیپ یک بیشتر از تیپ دو است. میزان افزایش مقادیر C'_p با کاهش Fr_1 برای محدوده پایین‌دست حوضچه تیپ دو تا حدودی بیشتر از تیپ یک است. در هر دو محدوده حوضچه‌ها در پرش مستغرق، ضریب C'_p با کاهش Fr_1 افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب C'_p در محدوده بالادست پرش مستغرق بیشتر از پرش آزاد است. در این ناحیه، شدت تلاطم پرش مستغرق بیشتر از پرش آزاد است. برای یک عدد فرود معین، متوسط درصد تغییرات مقادیر ضریب C'_p در پرش مستغرق نسبت به آزاد در امتداد حوضچه تیپ دو در مقایسه با تیپ یک، کاهش یافته است. مقادیر C'_{pmax} در پرش آزاد برای حوضچه‌های یک و دو به ترتیب در محدوده $22 > \Gamma_{Xmax}$ و $16 > \Gamma_{Xmax}$ واقع شده‌اند. میزان کاهش C'_{pmax} در حوضچه تیپ دو نسبت به تیپ یک در پرش آزاد به‌طور متوسط در حدود ۳۸ درصد است. با افزایش استغراق، مقادیر C'_{pmax} در اعداد فرود مختلف، کاهش می‌یابد.

اندازه‌گیری نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی تحت تأثیر شرایط آزمایشگاهی است. یک سری آزمایش‌های تکمیلی در فلوم‌های با ابعاد مختلف در داخل حوضچه‌های آرامش با ابعاد مختلف سرریز، بلوک پای تندآب و آستانه انتهایی دندانه‌دار با مقادیر بزرگ‌تر دبی جریان ورودی به‌منظور بررسی اثرات مقیاس پیشنهاد می‌شود. با تجزیه و تحلیل داده‌ها و استخراج مقادیر شدت نوسانات فشار و فشارهای

23. Neto E. F. T. and Marques M. G. 2008. Analysis of the pressure field in a submerged hydraulic jump downstream of a sluice gate. *Brazilian Journal of Water Resources*. 13(4): 55-68 (in Portuguese).
24. Novakoski C. K. Conterato E. Marques M. Teixeira E. D. Lima G. A. and Mees A. 2017. Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. *Brazilian Journal of Water Resources*. 22(22): 1-8.
25. Peterka A. J. 1984. Stilling basin for high dam and earth dam spillways and large canal structures (basin II). In *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. A water resources technical publication. Engineering Monograph No. 25. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation. USBR, Denver, Colorado, USA. 8th ed., pp. 19-30.
26. Pinheiro A. 1995. Hydrodynamic actions in thresholds for energy dissipation basin by hydraulic jumps. Ph.D. Thesis, Technical University of Lisbon, Portugal (in Portuguese).
27. Rajaratnam N. 1967. Hydraulic jumps. *Advances in Hydrosience*, Academic Press Inc. 4: 197-280.
28. Steinke Jr R. Dai Prá M. Lopardo R. A. Marques M. G. De Melo J. F. Priebe P. S. and Teixeira E. D. 2021. Low Froude number stilling basins-Hydrodynamic characterization. *Journal of Hydraulic Engineering*. 147(4): 04021010.
29. Stojnic I. Pfister M. Matos J. and Schleiss A. J. 2023. Air-water flow in a plain stilling basin below smooth and stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*. 61(1): 51-66.
30. Teixeira E. D. 2003. Prediction of pressure values close to the bottom of dissipation basins in hydraulic jumps. Master Thesis, Institute for Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre (in Portuguese).
31. Teixeira E. D. Marques M. G. Martinez C. B. Gomes J. F. and Endres L. A. M. 2004. Analysis of macroturbulence in energy dissipation structures using the state of variation of pressures and levels. *Brazilian Journal of Water Resources*. 9(1): 127-153 (in Portuguese).
32. Toso J. W. and Bowers C.E. 1988. Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(8): 829-843.
33. Yan Z. Zhou C. and Lu S. 2006. Pressure fluctuations beneath spatial hydraulic jumps. *Journal of Hydrodynamics*. 18(6): 723-726.
- spillway stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(4): 578-596.
12. Ghaderi A. Dasineh M. Aristodemo F. and Aricò C. 2021. Numerical simulations of the flow field of a submerged hydraulic jump over triangular macroroughnesses. *Water*. 13(5): 674.
13. Habibzadeh A. Wu S. Ade F. Rajaratnam N. and Loewen M.R. 2011. Exploratory study on submerged hydraulic jumps with blocks. *Journal of Hydraulic Engineering*. 137(6): 706-710.
14. Habibzadeh A. Rajaratnam N. and Loewen M. 2019. Characteristics of the flow field downstream of free and submerged hydraulic jumps. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. 172(4): 180-194. Thomas Telford Ltd.
15. Hampe R. F. Steinke Júnior R. Prá M. D. Marques M. G. and Teixeira E. D. 2020. Extreme pressure forecasting methodology for the hydraulic jump downstream of a low head spillway. *Brazilian Journal of Water Resources*. 25(1): 1-10.
16. Hasani M. N. Nekoufar K. Biklarian M. Jamshidi M. Pham Q.B. and Anh D.T. 2023. Investigating the pressure fluctuations of hydraulic jump in an abrupt expanding stilling basin with roughened bed. *Water*. 15(1): 80.
17. Hassanpour N. Hosseinzadeh Dalir A. Bayon A. and Abdollahpour M. 2020. Pressure fluctuations in the spatial hydraulic jump in stilling basins with different expansion ratio. *Water*. 13(1): 60.
18. Karimi M. Jahromi S. M. and Shafai-Bajestan M. 2017. Investigation of pressure fluctuations in hydraulic jump at sudden expansion of stilling basin. *Amirkabir J. Civil Engineering*. 49(2): 79-81.
19. Long D. Steffler P.M. and Rajaratnam N. 1990. LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*. 28(4): 437-460.
20. Lopardo R. A. Fattor C. A. Lopardo M. C. and Casado J. M. 2004. Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basin. *Hydraulics of dams and river structures*. London: AA Balkema. 133-138.
21. Marques M.G. Drapeau J. and Verrette J.L. 1997. Pressure fluctuation coefficient in a hydraulic jump. *Brazilian Journal of Water Resources*. 2(2): 45-52 (in Portuguese).
22. Mousavi S. N. Farsadizadeh D. Salmasi F. and Hosseinzadeh Dalir A. 2022. Flow characteristics and pressure parameters of free and submerged hydraulic jumps in the USBR stilling basins. *Amirkabir J. Civil Eng*. 53(10): 4125-4142.

